تأثیر ناکاملی‌های حلقوی بر ظرفیت باربری محوری پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک*

محمد پورمیرزا [۱] محمدعلی لطف‌اللهی‌یقین [۲] علی یوسفیه [۳] حسین شوکتی [٤]

چکیده *ظرفیت باربری محوری، رفتار کمانشی و فراکمانشی سازه‌های پوسته‌ای جدار نازک، به وجود ناکاملی‌های هندسی بسیار حساس می‌باشد. این ناکاملی‌ها ممکن است در فرآیند نورد، جابه جایی، نصب و یا جوشکاری حاصل گردند. یکی از انواع ناکاملی که در اثر عمل جوشکاری به وجود می‌آید و گزارش های زیادی ازتأثیر کاهنده‌ی آن بر ظرفیت باربری محوری در دست است، ناکاملی‌های حلقوی است. علی‌رغم بررسی‌های نسبتاً وسیع بر روی اثر ناکاملی‌ها بر ظرفیت کمانشی محوری سازه‌های پوسته‌ای جدار نازک، مشاهده شده است که اکثر این تحقیقات بر وجود ناکاملی‌های اعوجابی بر روی پوسته متمرکز شده‌اند و تحقیقات جامع و کاملی بر روی ناکاملی‌های حلقوی و خصوصاً تا تأثیر گستردگی این نوع ناکاملی بر ظرفیت محوری صورت نگرفته که مورد توجه تحقیق حاضر است. هم چنین در این مقاله سعی شده است که با استفاده از برنامه المان محدود ABAQUS، اثر متقابل دو ناکاملی بر روی هم و بر روی ظرفیت محوری سازه‌های جدار نازک در حالات مختلف تحلیل و تعیین گردد.*

واژه‌های کلیدی کمانش، فراکمانش، ناکاملی حلقوی، تحلیل غیرخطی، نمونه کامل

The Effect of Circumferential Imperfections on Axial Load Carrying Capacity of Thin-Walled Cylindrical Shells

M. Pourmirza M.A. Lotfollahi Yaghin A. Yousefieh H. Showkati

Abstract *The load carrying capacity, buckling and post-buckling behavior of cylindrical thin-walled shells exposed to axial loads are very sensitive to imperfections in the initial geometry. These imperfections are invariably caused by an assortment of manufacturing processes like displacing, installing or welding; one of the most important imperfections caused by welding that has been reported to have an essential detrimental effect on the buckling resistance of these shells under axial load is circumferential imperfections. Despite many determinations of the effect of imperfections on axial load carrying capacity of cylindrical thin-walled shells, the major part of these studies are concentrated on the existence of imperfections on the shell wall, and a comprehensive research on circumferential imperfections and their effects on axial load carrying capacity has not been performed. This is the main subject of this research. Also in this paper, the interaction of two imperfections on each other and on the load carrying capacity of cylindrical shells in various cases are analyzed and determined using a finite element program (ABAQUS).*

Key Words Buckling, Post-Buckling, Circumferential Imperfection, Non-Linear Analysis, Perfect Specimen.

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۹/۳/۲ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/۸/۲۳ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) کارشناس ارشد سازه، عضو باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه

(۲) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(۳) کارشناس ارشد سازه ، عضو باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

(٤) دانشیار، گروه عمران، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه ارومیه

مقدمه

وجود ناکاملی‌های اولیه‌ی هندسی، فارغ از هر نوع روش ساخت، در سازه‌های فولادی اجتناب ناپذیر است. یکی از مهم ترین این ناکاملی‌ها در اثر عملیات جوشکاری حاصل می‌شود. سیلوهای فلزی، مخازن بزرگ ذخیره ی نفت و مایعات و اکثر سازه‌های فولادی جدار نازک عظیم، از قرارگیری چندین پانل دارای انحناء در کنار یکدیگر تشکیل شده و معمولاً به منظور اتصال صفحات به یکدیگر، از عملیات جوشکاری استفاده می‌شود [1]. یک نوع از ناکاملی‌هایی که در اثر عملیات جوشکاری بر روی پوسته‌ی انواع سازه‌های جدار نازک فولادی به وجود می‌آید، ناکاملی حلقوی است که در اثر جوشکاری لبه ی صفحات پایین به صفحات بالا و به صورت یک حلقه ی پیوسته در پیرامون پوسته ی سازه رخ می‌دهد. بر طبق گزارشات و بررسی‌های گذشته، این نوع ناکاملی می‌تواند تأثیر زیادی بر میزان افت ظرفیت باربری این نوع سازه‌ها داشته باشد [2].

در هنگام تحقیق بر روی تأثیر ناکاملی‌های حلقوی بر میزان افت ظرفیت محوری ، چند نکته حائز اهمیت است: اول این که اگر در سازه‌ای یک ناکاملی حلقوی کامل وجود داشته باشد، رابطه ی میزان عمق هندسه ناکاملی با افت ظرفیت و شکل کمانش آن چگونه خواهد بود. دوم آن که اگر هندسه و عمق ناکاملی ثابت فرض شود، طول ناکاملی (بر حسب درجه) چه رابطه‌ای با میزان افت ظرفیت باربری محوری سازه خواهد داشت. در این تحقیق ، سعی شده است تمرکز بر روی تأثیر گستردگی ناکاملی (طول ناکاملی) بر میزان افت ظرفیت باربری محوری سازه‌های جدار نازک استوانه‌ای معطوف گردد. در پایان نیز اثر متقابل دو ناکاملی ۱۰° در دو وضعیت متفاوت بررسی شده و نتایج حاصل از آن در مقاله ی حاضر گزارش می‌گردد.

تحقیقات گذشته

نخستین پیشگویی‌ها برای به دست آوردن مقاومت کمانشی استوانه‌ها تحت بار محوری فشاری توسط لورنز (۱۹۰۸-۱۹۱۱) و تیموشنکو (۱۹۱۰-۱۹۱٤) و ساتول (۱۹۱٤) انجام گرفت. نتایج این بررسی‌ها همگی منحصر به پوسته‌های استوانه‌ای بدون ناکاملی بود که در آن ها فرض بر پوسته‌ای با طولی متعارف و بارگذاری متقارن و خطی در لبه بود. هم چنین فرض شده بود که رفتار مصالح پوسته ، کاملاً خطی باشد [3].

با توجه به روابط کلاسیک، تنش کمانشی بحرانی δ_{cl} از فرمول زیر به دست می‌آید که در آن ضریب پوآسون پوسته برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است:

$$\delta_{cl} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\upsilon^2)}}\frac{t}{R} \approx 0.605\frac{Et}{R} \qquad (۱)$$

که در این رابطه ، R ؛ شعاع استوانه، t ؛ ضخامت پوسته و E ؛ مدول الاستیسیته یانگ می‌باشد. معمولاً از این فرمول برای نرمال کردن نتایج پوسته بدون ناکاملی استفاده می‌شود.

یکی از مقالاتی که بر روی تأثیر ناکاملی های حلقوی در اثر عملیات جوشکاری بر روی سازه‌های پوسته‌ای استوانه‌ای جدار نازک نوشته شده است، مربوط به بری و هم کاران می‌باشد [3]. در این تحقیق، یک ناکاملی متقارن محوری بر روی پوسته نمونه‌ای به شعاع ۵۰۰ میلی متر و ارتفاع ۱۵۰۰ میلی متر، تحت بار محوری در نظر گرفته شده است. چندین نمونه در آزمایشگاه تست شده و سپس در رایانه مدل سازی و آنالیز گشته‌اند.

هم چنین در مقاله‌ی دیگری پیچر و هم کاران، بر روی اشکال مختلف ناکاملی که ممکن است در اثر عملیات جوشکاری بر روی پوسته این قبیل سازه ها حادث شود ، تحقیق نموده‌اند [2]. در نهایت چند شکل مختلف ناکاملی حلقوی متناسب با شرایط عملی و واقعی معرفی گردیده است. شکل ناکاملی حلقوی که در تحقیق حاضر استفاده گردیده، از همین مقاله اقتباس شده است.

مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای و مخازن تحت بار محوری فشاری، توسط کیم و هم کاران نوشته شده است [4]. در این مقاله ، سعی شده است تا رابطه‌ی عملی بهتری برای طراحی این سازه‌ها به دست آید که در

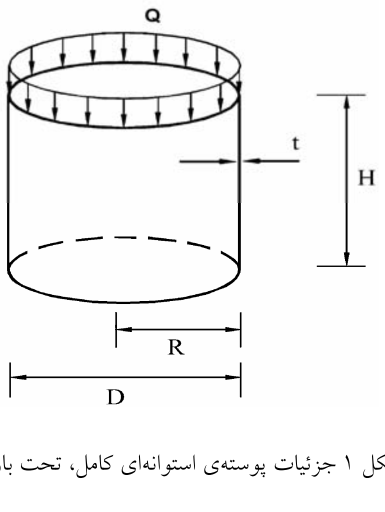
آن بر روی هندسه با ناکاملی و بدون ناکاملی پوسته بحث شده است. به منظور به دست آوردن ظرفیت کمانشی، از تحلیل عددی استفاده شده است. هم چنین تاثیر مخازن ساخته شده بر روی پی‌های کاملاً نرم و سخت ، بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است. در این مقاله ملاحظه می گردد که با افزایش میزان عمق ناکاملی اولیه ی هندسی، مقاومت کمانشی مخزن به صورت چشم گیری کاهش می‌یابد.

یوسفیه، تأثیر ناکاملی‌های حلقوی کامل و متقارن محوری را بر ظرفیت کمانشی و فراکمانشی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک، به روش المان‌های محدود مورد مطالعه قرار داده است [٥]. این تحقیق نشان می‌دهد که این نوع سازه‌ها بسیار حساس به عمق ناکاملی می‌باشند. در ادامه ی این تحقیق، اثر اندرکنش دو ناکاملی حلقوی کامل بر روی ظرفیت کمانشی پوسته بررسی شده است. البته در این پژوهش، تمامی ناکاملی هایی که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، به صورت ایده‌آل فرض شده و ناکاملی، کل محیط پیرامونی پوسته را به صورت کاملاً تئوریک و ثابت اشغال کرده است.

هم چنین پورمیرزا به بررسی آزمایشگاهی این نوع ناکاملی و تأثیرات آن بر ظرفیت و شکل کمانشی پوسته‌های جدار نازک پرداخته است [٦]. در این تحقیق از ١٢ نمونه با ٢ (R/t) مختلف که هر کدام دارای ناکاملی‌ای با طول و عمق خاص بود، استفاده شده است. در این بررسی آزمایشگاهی، اثر ناکاملی‌های حلقوی بر دو نوع جنس پوسته از فولاد سخت و نرم بررسی شده است.

مدل‌سازی نمونه استوانه‌ای با ناکاملی

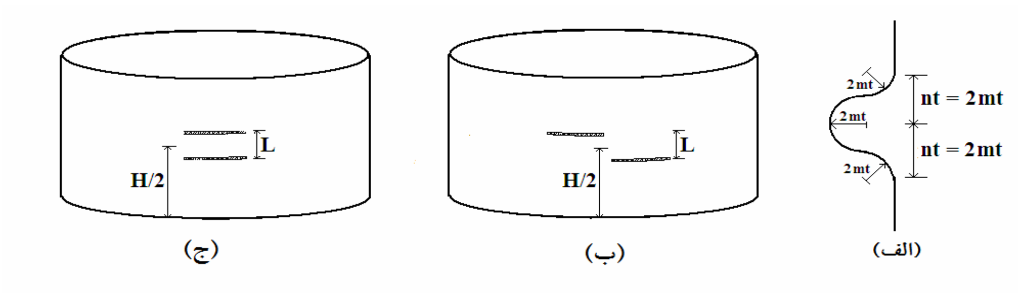
هندسه استوانه. با توجه به تحقیقات گذشته بر روی سازه‌های استوانه‌ای جدار نازک و هم چنین با توجه به محدودیت‌های آیین‌نامه‌های مربوطه [7,8]، تصمیم بر آن شد تا در همه ی مدل ها نسبت ارتفاع به شعاع ثابت و برابر یک در نظر گرفته شود که در شکل (١) آمده است. در ضمن اتخاذ این تصمیم به دلیل اثرگذاری ناچیز این پارامتر بر نتایج تحلیل قابل توجیح می‌باشد؛ امادرا کثرمقالات ، ضریب لاغری های (R/t) مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر به جای بررسی یک ناکاملی با هندسه ی ثابت و طول های مختلف بر روی چند نوع (R/t) متفاوت، اثرسه ناکاملی حلقوی با اعماق متفاوت بر روی یک نمونه با (R/t) ثابت، مطالعه شده است. علت این تصمیم، وابستگی پارامتر عمق ناکاملی به ضخامت پوسته (t) می‌باشد (چون این نوع ناکاملی معمولاً در اثر عمل جوشکاری به وجود آمده و متناسب با ضخامت پوسته تولید می‌شود) و در صورتی که (R/t) عوض شود، عمق ناکاملی نیز تغییر خواهد کرد. چنانچه علاوه بر مقدار (R/t)، عمق ناکاملی نیز تغییر پیدا کند، دو گروه، وجه اشتراکی جهت مقایسه نخواهند داشت و استخراج نتیجه‌ای واحد و نهایی که عمومیت داشته باشد، ممکن نخواهد بود. بر این اساس، یک نمونه ی استوانه‌ای ثابت با مشخصاتی مطابق جدول (١) مورد تحلیل قرار گرفت که در آن، ارتفاع و شعاع نمونه برابر ٢٢/٥ سانتی متر و ضخامت پوسته ی نمونه، ٤ میلی متر در نظر گرفته شده است.



شکل ١ جزئیات پوسته‌ی استوانه‌ای کامل، تحت بار محوری

جدول ۱ مشخصات مکانیکی و هندسی نمونه ها

υ	E (پاسکال)	ضخامت (میلی متر)	شعاع و ارتفاع (میلی متر)	تنش گسیختگی (MPa)	کرنش نظیر نقطه گسیختگی (%)
۰/۳	۲/۱*۱۰۱۱	۰/٤	۲۲۵	۳۲۰	۳۱



شکل ۲ شکل ناکاملی و موقعیت قرارگیری آن بر روی پوست الف) هندسه‌ی ناکاملی حلقوی ب) نحوه‌ی قرارگیری دو ناکاملی در حالت E ج) نحوه‌ی قرارگیری دو ناکاملی در حالت P

حالات ناکاملی. با توجه به تحقیقات گذشتگان و مقالات نگارش شده در این راستا [9,10] مناسب ترین هندسه‌ی ناکاملی که با واقعیت هم خوانی بیشتری دارد، در مقاله‌ی حاضر انتخاب گردیده است که در شکل (۲–الف) نمایش داده می‌شود. این شکل ناکاملی، از ترکیب چهار ربع دایره با شعاع mt (m برابر ضخامت پوسته) تشکیل شده است. هم چنین به منظور بررسی اندرکنش دو ناکاملی بر روی ظرفیت و شکل کمانشی پوسته، دو ناکاملی مشابه و موازی با فواصل مختلف و به دو صورت متفاوت مدل گردیدند. در حالت اول، دو ناکاملی موازی، در امتداد یکدیگر ولی در ترازهای متفاوت، قرار گرفته‌اند که از این به بعد به اختصار حالت E نامیده می‌شود، شکل (۲– ب). در حالت دوم، دو ناکاملی موازی، کاملا بر روی هم قرار دارند که این حالت به اختصار حالت P نام گذاری میشود، شکل (۲– ج). فاصله ی قائم مرکز به مرکز دو ناکاملی با (L) نمایش داده می‌شود.

جزئیات نمونه‌ها و نحوه ی نام گذاری. به منظور بررسی صحیح و دقیق رفتار کمانشی و فراکمانشی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک دارای ناکاملی حلقوی تحت بار محوری، از ٦٤ مدل تحلیلی استفاده شده است که یکی از آن ها کامل و بدون نقص هندسی می‌باشد و بقیه هر کدام دارای یک و یا دو ناکاملی حلقوی متفاوت می‌باشند که براساس جدول (۲) نام گذاری می‌شوند.

جدول ۲ نحوه‌ی نام گذاری نمونه ها

عمق ناکاملی (t)		فاصله‌ی دو ناکاملی (میلی متر)		طول ناکاملی (درجه)		حالت دو ناکاملی	
E	در امتداد	L0	۰	D01	۱۰	A	۱
P	روی یکدیگر	L1	۱۰	D02	۱۵	B	۱/۵
		L2	۲۰	D03	۲۰	C	۲
		L3	۳۰	D04	۲۵		
		L4	۵۰	D05	۳۰		
		L5	۷۵	D06	٤۵		
				D07	٦۰		
				D08	۷۵		
				D09	۹۰		
				D10	۱۸۰		

به طور مثال، BD01L3E نشان دهنده ی نمونه‌ای است که در آن، عمق ناکاملی 1.5t و طول ناکاملی آن°۱۰ انتخاب شده است. هم چنین این نمونه دارای دو ناکاملی

به حالت E با فاصله‌ی ۳۰ میلی متر از یکدیگر می‌باشد. در ضمن، یک نمونه بدون ناکاملی حلقوی با نام Perfect نیز در نظر گرفته شده است.

نکات مدل‌سازی و تحلیل. برای به دست آوردن بار کمانشی مدل‌های اجزاء محدود در برنامه ی ABAQUS، می‌توان از دو روش خطی (مقادیر ویژه) و روش غیرخطی استفاده نمود. در روش اول با توجه به نتیجه‌ی آنالیز استاتیکی خطی و نیروهای داخلی، ماتریس سختی هندسی کل سازه محاسبه شده و سپس با استفاده از معادلات تعادل، مقادیر ویژه به دست می‌آیند. در روش خطی، مود شکل‌های کمانشی و ضرایب بار برای هر مود ارائه می‌گردد، اما این نوع آنالیز تنها توزیع کلی تنش و جابه جایی‌های نسبی را محاسبه می‌کند [11].

به منظور محاسبه‌ی مقادیر واقعی جابه جایی و تنش‌ها می‌بایست از روش‌های غیرخطی بهره برد. به همین منظور در این تحقیق از روش طول قوس (Riks) استفاده گردیده است. این روش، روشی مناسب برای حل مسائل کمانشی غیرخطی محسوب می‌شود. با استفاده از این شیوه، می‌توان مسیرهای تعادلی بار- جابه جایی را دنبال نمود. در این متد، برخلاف روش‌های حل مقادیر ویژه، رفتار مصالح و هندسه غیرخطی در نظر گرفته می‌شود و این امر باعث نزدیکی نتایج متد (Riks) (که در واقع روشی غیرخطی است) با واقعیت خواهد شد. تنها نکته‌ای که در هنگام به کارگیری این روش تحلیلی باید در نظر داشت، این است که ممکن است برنامه پس از رسیدن به نقطه‌ی دو شاخگی، مسیر ناپایدار را دنبال کند که باعث منفی شدن مقادیر بار می‌گردد که با کوتاه اختیار کردن طول حداکثر کمان، می‌توان از این امر جلوگیری نمود. برای انتخاب نوع المان نیز با توجه به تحقیقات گذشته [1] و راهنمای کتابخانه المان‌های نرم‌افزار [12] از المان S4R استفاده شده است که مخصوص پوسته‌ها بوده و ٦ درجه آزادی برای هر گره در نظر می‌گیرد. این المان جهت استفاده در تحلیل‌های خطی و غیرخطی (مصالح و هندسه) طراحی شده است و در مواردی که تغییر شکل‌های بزرگ رخ می‌دهد کاربرد دارد. در ضمن به منظور بالا بردن دقت تحلیل، در قطایی از استوانه که در آن ناحیه، ناکاملی حلقوی وجود دارد، فاصله شعایی مش‌بندی پوسته نصف سایر نقاط در نظر گرفته شده است.

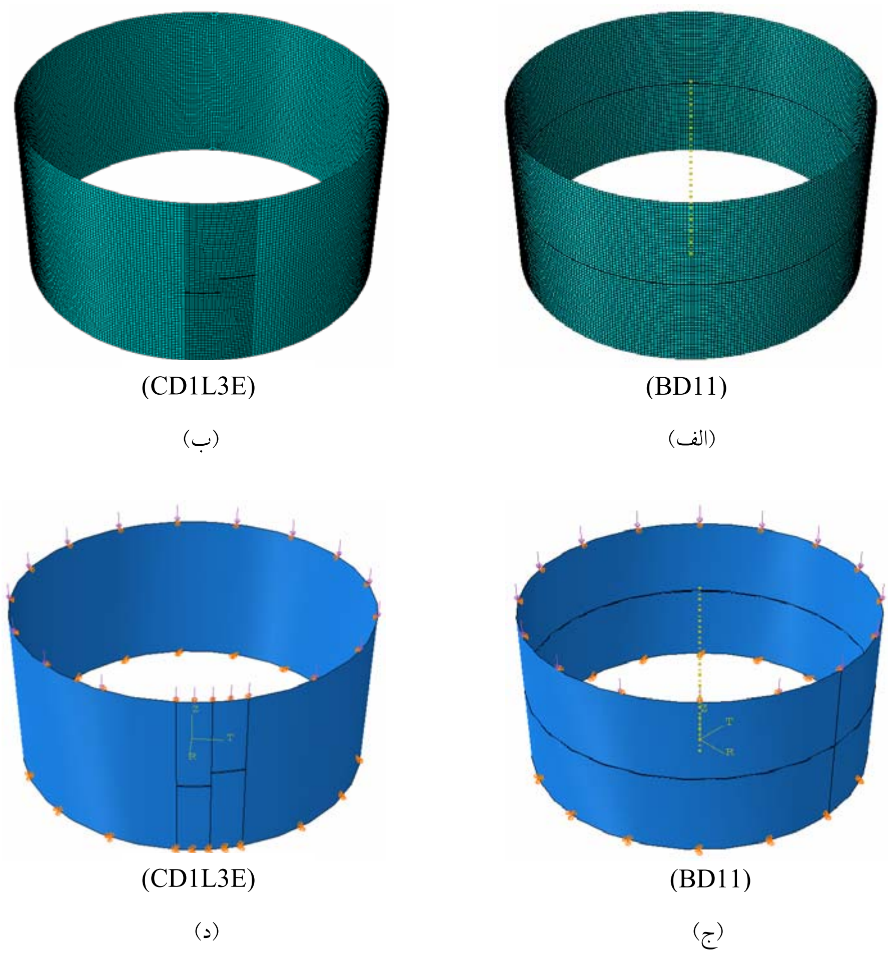
جهت بارگذاری، از بار گسترده بر روی لبه پوسته‌ای استفاده شده است. شرایط تکیه‌گاهی در لبه پایینی به صورت کاملاً مفصلی است؛ یعنی هر ۳ مؤلفه جابه جایی بسته فرض شده و ۳ مؤلفه چرخش باز هستند. در لبه‌ی بالایی، تنها مؤلفه‌ی شعاعی بسته شده است. در شکل (۳) نمونه‌ای از نوع بارگذاری، شرایط مرزی لبه‌ها و نوع مش‌بندی ارائه شده است.

هم‌چنین بر روی نمونه‌ی بدون نقص هندسی و نمونه‌هایی که دارای ناکاملی حلقوی ۳٦۰ درجه بوده‌اند، مدهای کمانشی اول و سوم حاصل از تحلیل خطی Buckling با ضرایب کاهنده، به نمونه‌ی تحلیلی غیرخطی اعمال گردیده است تا این نمونه‌ها از حالت کاملاً متقارن خارج شده و با واقعیت تطبیق، بیشتری پیدا کنند.

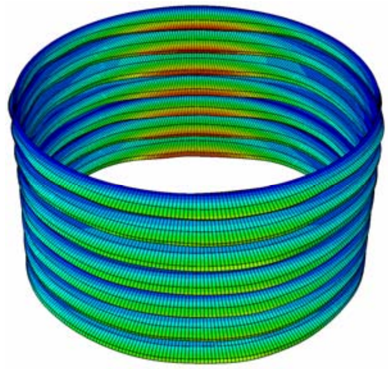
بررسی نتایج تحلیل

مقایسه‌ی بین نتایج تئوریک و عددی. همان طور که ذکر گردید در اکثر مقالاتی که در مورد پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک تحت بار محوری تحقیق شده است، به منظور نرمال کردن نتایج نمونه‌های بدون نقص هندسی از فرمول (۱) استفاده می‌گردد. اما این فرمول تئوریک، تنها در مواردی صادق است که تکیه‌گاه‌ها به صورت کلاسیک مفروض گردد (فقط مؤلفه شعایی بسته

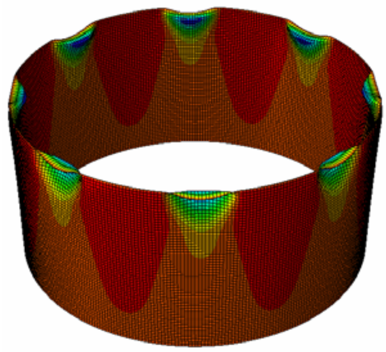
باشد). به همین دلیل، این فرمول در مورد نمونه‌های مورد بحث در این مقاله صادق نبوده و بـه علـت عـدم وجـود فرمولی مشابه برای ایـن حالـت تکیـه‌گـاهی و یـا انجـام تحقیقی مشابه، امکان مقایسه‌ی مستقیم نمونه‌های کامل و یا دارای نقص هندسی وجود نـدارد؛ لـذا جهـت کـالیبره نمودن نمونه‌هـا و اطمینـان از صـحت نتـایج تحلیـل‌هـا، تکیه‌گاه‌های نمونه بدون ناکاملی حلقوی به صورت پـیش فرض فرمول فوق و به صورت متقـارن تبـدیل گـشت و تحلیل خطی انجام گردید. براساس این تحلیل خطی، بـار کمانشی ۱۳۰۱۸ کیلوگرم به دست آمـد کـه تـصویر ایـن نمونه پس از کمانش در شکل (٤– الف) آمـده اسـت. از طرف دیگر و بر اساس فرمول (۱) و مشخصات هندسـی و مکانیکی نمونه، بار کمانشی ۱۳۰۲۰ کیلوگرم به دسـت می‌آید که تقریباً با مقدار به دست آمـده از تحلیـل خطـی برنامه ABAQUS برابری مـی‌کنـد. ایـن تـساوی، نـشان می‌دهد که روند مدل‌سازی، معرفی مشخصات مکانیکی و شرایط مرزی و بارگذاری نمونه صحیح می‌باشد.



شکل ۳ نحوه‌ی مش بندی، بارگذاری و شرایط مرزی نمونه ها: الف) مش بندی مدل با یک ناکاملی، ب) مش بندی مدل با دو ناکاملی، ج) شرایط مرزی و بارگذاری نمونه با یک ناکاملی، د) شرایط مرزی و بارگذاری نمونه با دو ناکاملی



(الف)



(ب)

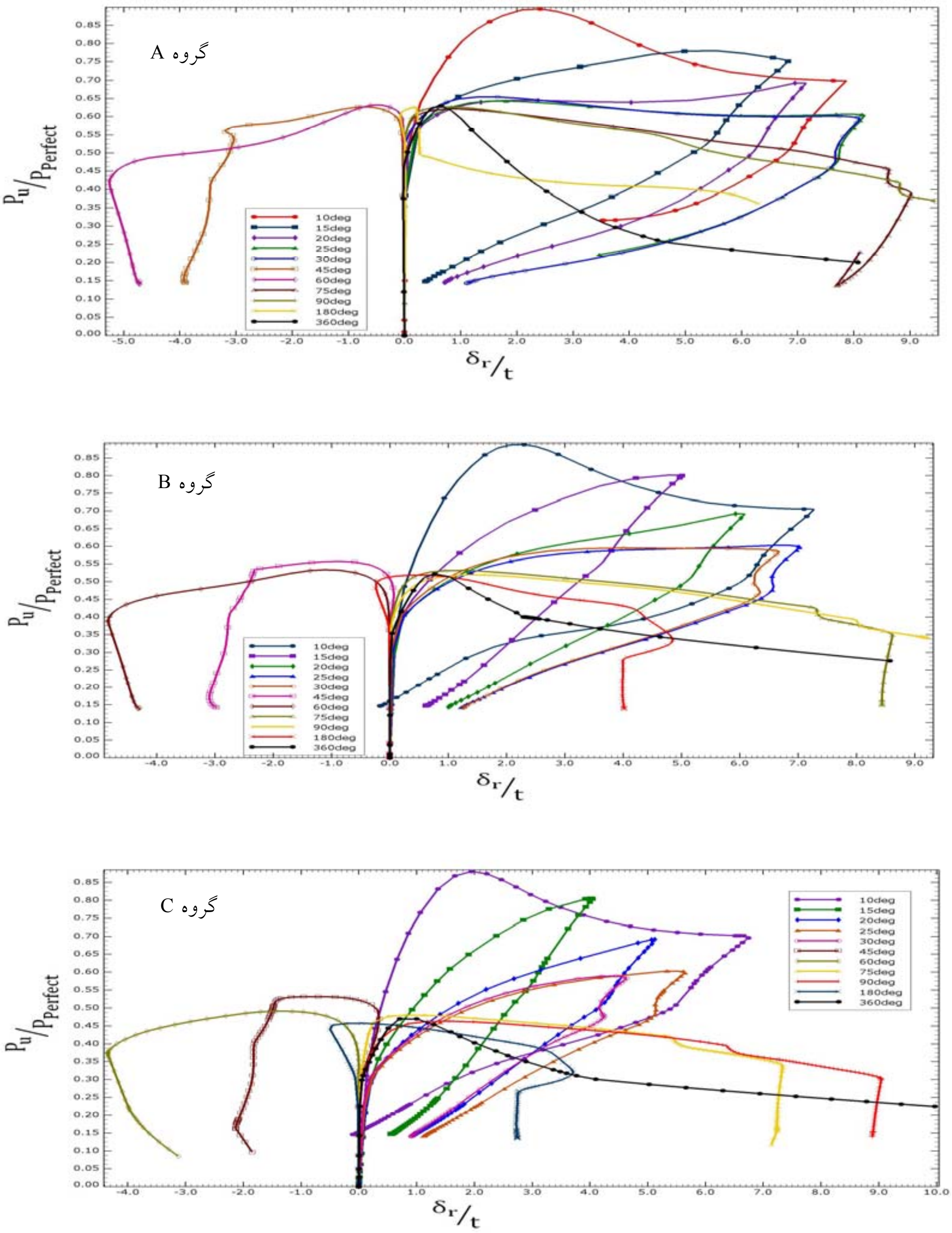
شکل ٤ الف) نمونه‌ی بدون نقص هندسی با تکیه گاه متقارن تحت تحلیل خطی، ب) نمونه‌ی بدون نقص هندسی با تکیه گاه نا متقارن، تحت تحلیل غیر خطی

پس از اطمینان از صحت نتایج، این بار همان نمونه با شرایط مرزی اولیه (قید مماسی تکیه‌گاه پایینی نمونه بسته فرض شده است) تحت آنالیز غیرخطی گرفت و بار کمانشی این نمونه (که مقدار آن تقریباً ۷۰۷۵ کیلوگرم می‌باشد) به عنوان شاخص و معیاری برای مقایسه نمونه‌ها با ناکاملی‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفت. در شکل (٤- ب) تصویر نمونه ی بدون نقص هندسی پس از تحلیل غیرخطی نشان داده می‌شود.

تأثیر طول ناکاملی. همان طور که در جدول (۱) مشاهده گردید، از ۳۳ مدل ناکاملی با زاویه‌های مرکزی (طول‌های) مختلف از °۱۰ تا °۳٦۰ استفاده شده است که شامل ۳ عمق مختلف و ۱۱ طول متفاوت ناکاملی می‌باشد که در همه‌ی نمونه‌ها، ناکاملی در وسط ارتفاع پوسته ایجاد شده است. برای مقایسه‌ی نتایج، یک مدل نیز به صورت بدون نقص هندسی تحلیل شده است که مبنایی برای سایر حالات محسوب می‌شود. هم چنین به منظور بررسی نتایج، از دو نوع نمودار استفاده شده است؛ یک نمودار بار- تغییرمکان برای نقطه‌ای که در وسط طول ناکاملی و در حداکثر عمق آن واقع شده، رسم گردیده است. برای بی بعدسازی پارامترهای این نمودار، مقادیر محور افقی بر ضخامت پوسته (t) و مقادیر محور قائم بر مقدار بار کمانشی نمونه بدون نقص هندسی (P_p) تقسیم شده است، شکل (۵). نمودار دوم براساس بارهای کمانشی تنظیم گردیده که از روی این نمودار به راحتی تأثیر طول‌های مختلف ناکاملی بر ظرفیت کمانشی پوسته‌ها قابل مشاهده است، شکل (٦). شایان ذکر است که در این اشکال (P_p) معرف بار کمانشی نمونه‌ی بدون ناکاملی حلقوی (Perfect)، (P_U) نشان دهنده‌ی بار کمانشی نمونه‌ها و (δ_r) تغییر مکان شعایی نمونه است.

در شکل (۵) نمودار بار- تغییرمکان مربوط به سه گروه مختلف A تا C آمده است. اولین مطلبی که از این نمودارها دریافت می‌شود، کاهش میزان افت ظرفیت باربری محوری با آهنگ کاهش طول ناکاملی است که البته روند آن خطی و ثابت نیست. با دقت در نمودارها، مشاهده می‌گردد در نمونه‌هایی که در آن‌ها میزان افت ظرفیت کم تر از حالت °۳٦۰ بوده، حالت فراکمانش همراه با تغییر مکان نسبتاً زیاد پدید آمده است. هر چه میزان افت ظرفیت کم تر شود، این حالت فراکمانشی مشهودتر خواهد شد. در چند نمونه حتی ظرفیت فراکمانشی از ظرفیت کمانشی نمونه نیز بیشتر شده و برخلاف نمونه‌های با طول ناکاملی زیاد، خرابی به‌صورت ناگهانی و با شیب تند رخ نمی‌دهد. برای بررسی تأثیر طول‌های مختلف ناکاملی بر ظرفیت کمانشی پوسته‌ها ابتدا در جدول (۳)، درصد افت ظرفیت باربری محوری هر یک از نمونه‌ها نسبت به حالت کامل، آمده است. بر

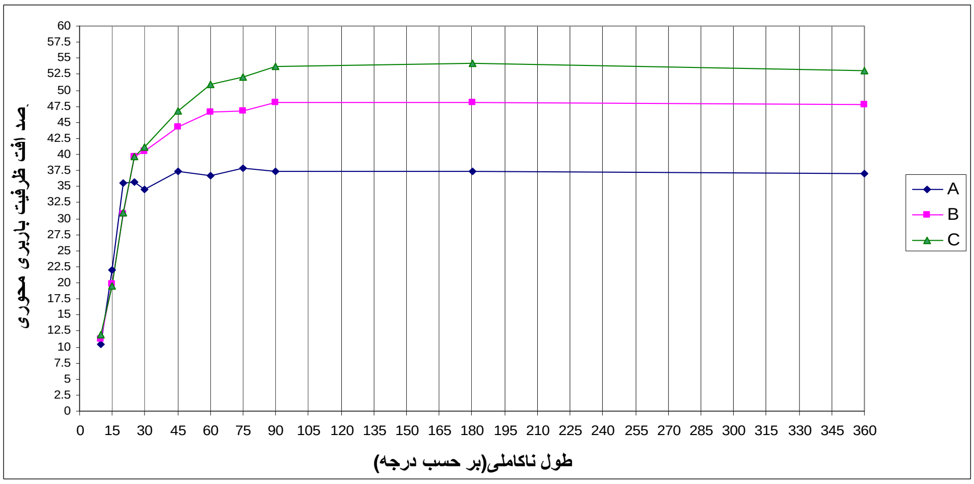
اساس اطلاعات این جدول، می‌توان نمـودار (٦) را رسـم نمود که در آن آهنگ تغییر ظرفیـت کمانـشی نمونـه‌هـا، نسبت به طول ناکاملی‌های حلقوی نشان داده می‌شود. در این نمودار، محور افقی، نشان دهنده‌ی طول ناکـاملی، بـر اساس زاویه‌ی مرکزی و برحسب درجه می‌باشـد. محـور قائم این نمودار نیز درصد افت ظرفیت را نسبت به حالت پوسته‌ی کامل نشان می‌دهد.



شکل ۵ نمودارهای بار- تغییر مکان برای گروه‌های A تا C با طول‌های متفاوت ناکاملی

جدول ۳ درصد افت ظرفیت باربری نمونه ها با طول های متفاوت ناکاملی

گروه	$(1 - P_u / P_p)\%$										
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11
A	۱۰/٤٨	۲۱/۹۹	۳۵/٤۹	۳۵/۷۰	۳٤/۵۷	۳۷/۳۲	۳٦/۷۷	۳۷/۸۹	۳۷/۳۱	۳۷/٤۱	۳۷/۰۹
B	۱۱/۱۷	۱۹/۸۹	۳۰/۷۸	۳۹/۷۲	٤۰/٤٨	٤٤/۲۵	٤٦/٦۳	٤٦/۸۳	٤٨/۰۹	٤٨/۱۳	٤۷/۸۳
C	۱۱/۹۲	۱۹/۵۰	۳۰/۸٤	۳۹/٦٨	٤۱/۱۰	٤٦/۸۲	۵۰/۸۷	۵۲/۰۰	۵۳/٦٨	۵٤/۲٦	۵۳/۰۳



شکل ٦ نحوه‌ی تغییرات درصد افت ظرفیت باربری محوری، به ازای میزان کاهش طول ناکاملی، مربوط به هر ۳ گروه

از جدول (۳) و شکل (٦) چندین نتیجه حاصل می‌شود که مهم‌ترین آنها به شرح زیر می‌باشند:

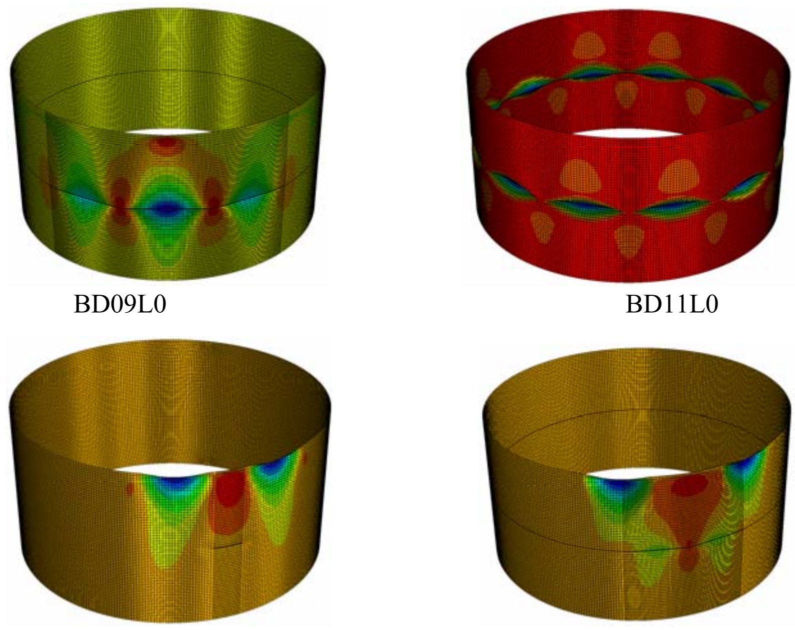
۱. با افزایش عمق ناکاملی و ثابت ماندن طول آن، میزان افت ظرفیت باربری محوری به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد (از حدود۳۷٪ در حالت 1t به ۵۳٪ در حالت 2t).

۲. نرخ تغییر میزان افت ظرفیت باربری محوری در هر ۳ گروه، شامل دو قسمت می‌باشد: یک ناحیه که در آن کوتاه شدن طول ناکاملی تأثیری بر ظرفیت باربری محوری نمونه‌ها نداشته و مقدار آن تقریباً با حالت °۳٦۰ برابری می‌کند و ناحیه‌ی دیگر (بعد از مقدار خاصی) که با کم‌تر شدن طول ناکاملی، کاهش میزان افت ظرفیت باربری محوری مشاهده می‌شود.

۳. در هر ۳ گروه، میزان افت ظرفیت باربری محوری نمونه‌هایی که در آنها طول ناکاملی از °۹۰ کم‌تر می‌باشد، تغییراتی نسبت به حالت °۳٦۰ مشاهده می‌گردد، اما مشهود است که این تغییرات در گروه‌هایی که عمق ناکاملی در آنها بیشتر است، روند نزولی شدیدتری را دنبال می‌کنند. به عنوان مثال در گروه A، میزان افت ظرفیت باربری محوری نمونه‌ای با طول ناکاملی °۲۰ تقریباً برابر با حالت °۳٦۰ می‌باشد و در طول‌های کم‌تر از آن به شدت از میزان افت ظرفیت باربری محوری کاسته می‌شود؛ در حالی که همین امر در گروه C، که در آن عمق ناکاملی نسبت به حالت قبل دو برابر انتخاب شده است، در مورد نمونه‌هایی صادق است که طول زاویه‌ی ناکاملی‌ای کم‌تر از °٦۰ دارند.

٤. هر ۳ گروه در طول ناکاملی با زاویه‌ی مرکزی در حدود °۱۵، درصد افت ظرفیت باربری محوری تقریباً برابری خواهند داشت و در ناکاملی‌ها با طول های زاویه‌ای کوتاه‌تر از این حد، دیگر عمق ناکاملی تعیین کننده میزان افت ظرفیت نبوده و همگی تقریباً یک میزان افت ظرفیت باربری محوری را تولید می‌کنند. در حقیقت می‌توان ناکاملی‌های کوتاه‌تر از این حد را، فرورفتگی (Dent) محسوب کرد.

جهت بررسی چگونگی کمانش و تغییر شکل پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک تحت بار محوری، در شکل (۷) چند نمونه متفاوت از گروه B پس از کمانش ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که در کلیه‌ی نمونه ها به جز نمونه‌ی BD11L0 که در آن طول ناکاملی ۳۶۰° می‌باشد، علاوه بر ایجاد موج‌های کمانش بر روی ناحیه‌ی ناکاملی، در لبه‌ی بالایی نمونه‌ها و در محلی که ناکاملی شروع و یا پایان می‌پذیرد، یک و یا دو حفره‌ی کمانشی بزرگ تولید می‌گردد. هر چه طول ناکاملی‌ها کوتاه‌تر می‌شود، کمانش اولیه‌ای که بر روی ناحیه‌ی ناکاملی به وجود می‌آید، محدودتر گشته و حفره‌های کمانشی نزدیک به تکیه گاه تقویت می‌شوند. در برخی از نمونه‌ها که طول ناکاملی در آن‌ها خیلی کوتاه انتخاب شده است، (مانند نمونه BD01L0 در شکل (۷))، موج‌های کمانشی ثانویه که در نزدیکی تکیه‌گاه ایجاد می‌گردند، بر روی جهت حرکت موج‌های کمانشی اولیه که روی خود ناحیه ناکاملی به وجود آمده‌اند، تأثیر می‌گذارند و موجب حرکت معکوس آن‌ها به سمت خارج پوسته می‌شوند. این امر در نمودارهای بار- تغییر مکان شکل (۵) به‌صورت تغییر جهت تغییر مکان‌های اغلب نمونه‌ها پس از کمانش، کاملاً واضح به چشم می‌خورد. دلیل تولید موج‌های کمانشی در نزدیک لبه ی بالایی و در ناحیه‌ای که ناکاملی شروع و یا تمام می‌شود را می‌توان به این صورت بیان کرد که در ابتدا با اضافه شدن نیرو بر روی استوانه‌ی جدار نازک، در ناحیه‌ای که ناکاملی حضور دارد، یک کمانش اولیه (Initial Buckling) تولید می‌گردد. این ناحیه به‌علت کمانش اولیه، دیگر قادر به تحمل بار نخواهد بود، لذا بار بر روی سایر قسمت های لبه که ناکاملی ندارند، باز توزیع می‌شود و با ادامه‌ی بارگذاری نمونه از یک و یا هر دو سمت ناکاملی و در نزدیکی لبه‌ی بالایی که قید کم‌تری نسبت به تکیه‌گاه پایینی دارد و در آن تمرکز تنش به وجود آمده است، مجدداً دچار کمانش می‌گردد. بر روی نمودارهای بار- تغییر مکان (شکل (۵)) از لحظه‌ی کمانش اولیه تا کمانش ثانویه را می‌توان به‌صورت یک خط با شیب منفی کم مشاهده نمود. حتی در بعضی از نمونه‌ها که طول ناکاملی در آن‌ها خیلی کوتاه است، شیب این ناحیه، کمی مثبت شده و نمودار حالت فراکمانشی پیدا می‌کند (به‌طور مثال در نمودار نمونه AD03L0 در شکل (۵) که در آن حالت، فراکمانشی به وضوح مشاهده می‌گردد).



شکل ۷ تصاویر چند نمونه از گروه B پس از کمانش

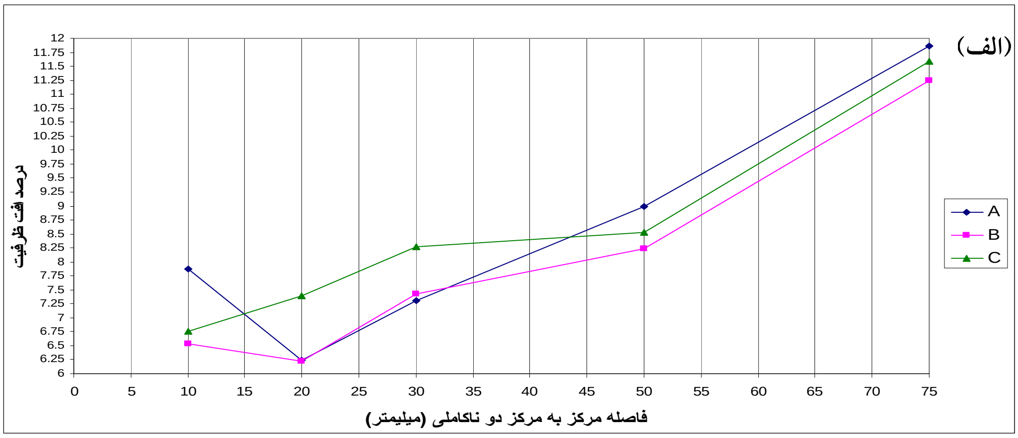
اندرکنش بین دو ناکاملی. همان‌طور کـه در شـکل (۷) مشاهده می‌گردد، در اطراف هـر ناکـاملی، چنـدین مـوج تشکیل می‌شود. در حقیقت می‌توان گفـت کـه هـر خـط ناکاملی محدوده‌ای از پوسته را متأثر می‌کند. حال بررسی می‌گردد که اگر بر روی پوسته یـک نمونـه بـیش از یـک ناکاملی وجود داشته باشد (که در مخـازن و نمونـه هـای واقعی بدین صورت است) چه تأثیری می‌توانند بـر روی هم و بر روی ظرفیت باربری محوری این سازه‌هـا ایجـاد نمایند. به منظور بررسی این اندرکنش، مـی‌تـوان حـالات بسیار زیاد و متنوعی را تصور کرد. در این راستا می‌تـوان به اندرکنش بین چند ناکاملی با طول‌های متفاوت، اعماق مختلف و یا با حالات قرارگیری گونـاگون تـا انـدرکنش بین چند ناکاملی اشاره نمـود. در ایـن تحقیـق، بـه‌علـت محدودیت، سعی شده است دو حالت معمول که در بخـش (۳-۲) به طور کامل تشریح شده و به اختـصار حـالات P و E نام‌گذاری گردیدند، مورد بررسی قرار گیرد.

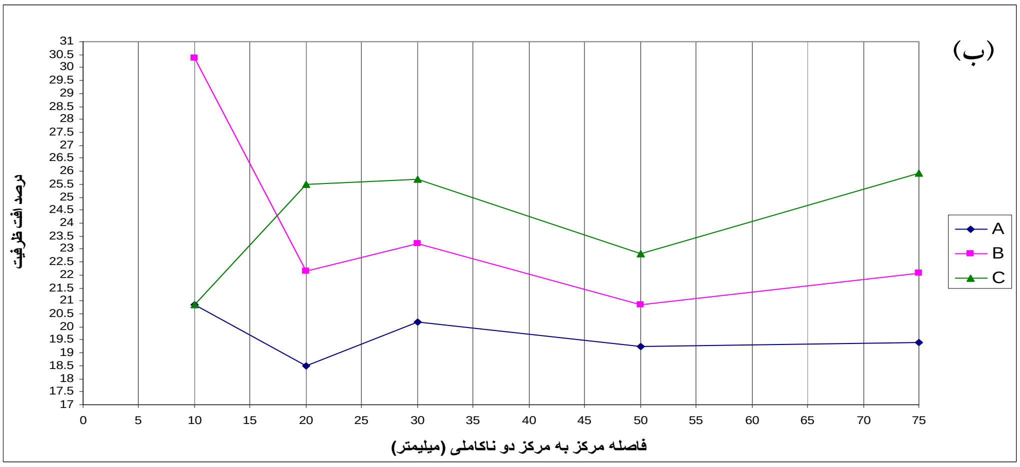
پس از آنالیز این نمونه‌ها توسـط المـان محـدود و بررسی مقادیر مربوط بـه بـار کمانـشی حـداکثر و تغییـر شکل‌های حاصله و تغییرات بـار- تغییرمکـان (بـه‌علـت محدودیت حجم مقاله، ارائه نشده است)، نتایج زیر قابـل ارائه می‌باشد:

۱. با توجه به درصد افت ظرفیت باربری محوری هر یک از نمونه‌ها نسبت به حالت کامل ارائه شده در جـدول (٤) و شکل (۸- الف)، مشاهده می‌گردد که در هـر ۳ گروه، وجود دو ناکاملی در حالت P، اثر کاهنده‌ای بـر ظرفیت کمانشی نمونه‌ها نـدارد؛ بلکـه تقریبـاً در اکثـر موارد با نزدیک‌تر شدن دو ناکاملی موازی به یکـدیگر درصد افت ظرفیت باربری محوری کـاهش مـی‌یابـد. به‌طور مثـال، میـزان افـت ظرفیـت بـاربری محـور در نمونـه‌ی CD01L5P کـه فاصـله‌ی دو ناکـاملی آن ۷۵ میلی‌متـر اسـت، ۱۱/۵۸٪ و در نمونـه CD01L1P کـه فاصله‌ی دو ناکاملی به ۱۰ میلـی‌متـر تقلیـل مـی‌یابـد، درصد افت ظرفیـت بـاربری محـوری نیـز بـه ٦/۷٦٪ نزول می‌کند. البتـه ایـن رونـد، کـاملاً خطـی نبـوده و ممکن است مانند نمونه AD01L1P به‌جـای کـاهش، افزایش افت در ظرفیت باربری محوری مشاهده گردد؛ ولی در هـیچ یـک از حـالات، افـت ظرفیـت بـاربری محوری محسوسی، نـسبت بـه حـالتی کـه تنهـا یـک ناکاملی بر روی پوسته وجـود داشـته باشـد، مـشاهده نمی‌گردد.

جدول ٤ درصد افت ظرفیت باربری محوری نمونه‌های با دو ناکاملی، نسبت به حالت کامل

گروه	$(1-P_u/P_p)\%$									
	D01L1		D01L2		D01L3		D01L4		D01L5	
	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E
A	۷/۸۸	۲۰/۸۵	٦/۲٤	۱۸/٤۹	۷/۳۰	۲۰/۱۹	۸/۹۹	۱۹/۲۵	۱۱/۸٦	۱۹/٤۱
B	٦/۵۳	۳۰/۳۸	٦/۲۳	۲۲/۱٦	۷/٤۳	۲۳/۲۲	۸/۲۳	۲۰/۸٦	۱۱/۲۵	۲۲/۰۸
C	٦/۷٦	۲۰/۸۵	۷/۳۹	۲۵/۵۱	۸/۲۷	۲۵/٦۸	۸/۵۲	۲۲/۸۳	۱۱/۵۸	۲۵/۹۲

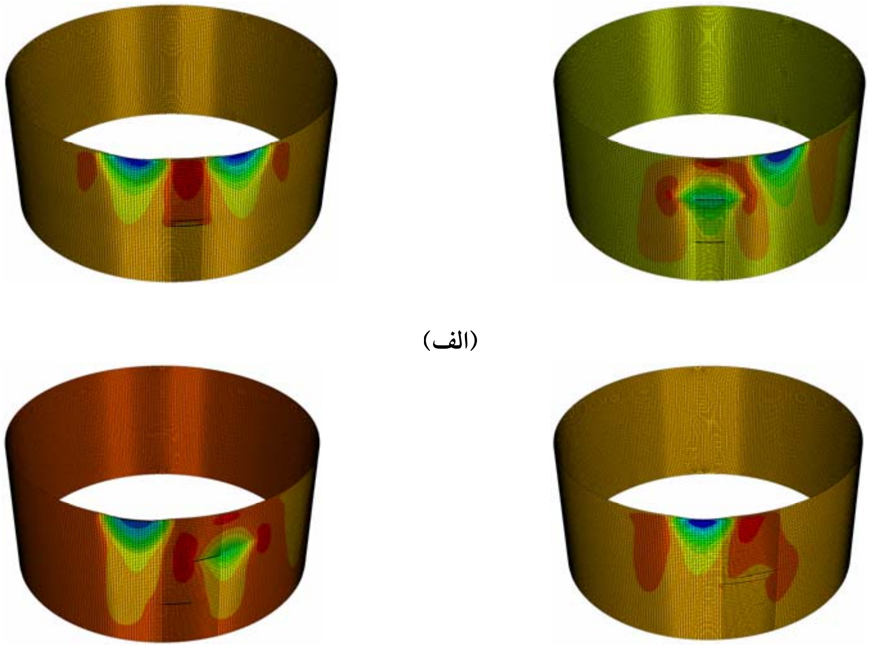




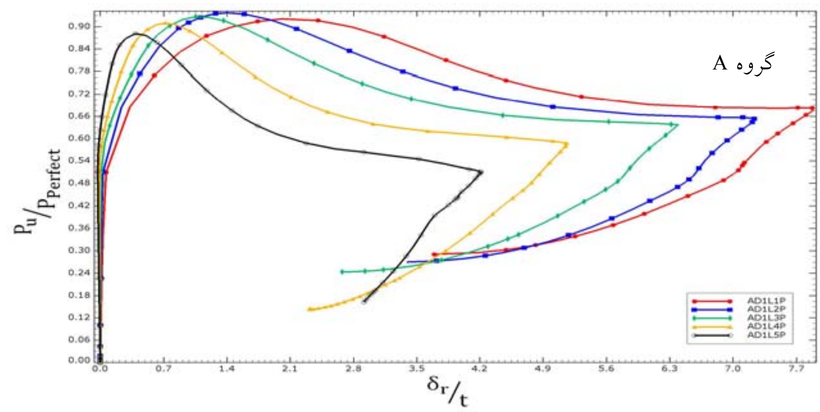
شکل ۸ نمودار درصد افت ظرفیت باربری محوری نمونه‌ها برحسب فاصله‌ی دو ناکاملی: الف) در حالت P، ب) در حالت E

۲. وجود دو ناکاملی در حالت E بر روی پوسته‌ی استوانه‌ای جدار نازک، می‌تواند باعث افت ظرفیت باربری محوری بیشتری نسبت به یک ناکاملی تنها تولید گردد (جدول (٤) و شکل (۸– ب)). این افزایش افت در بعضی از نمونه‌ها حتی برابر حالتی است که طول ناکاملی تک، ۲ برابر یعنی °۲۰ باشد (بطور مثال در نمونه BD01L1E). روند تغییرات نمودار شکل (۸– ب) نیز خطی نمی‌باشند؛ ولی می‌توان گفت که با کم شدن مقدار فاصله L روندی صعودی را طی می‌کند.

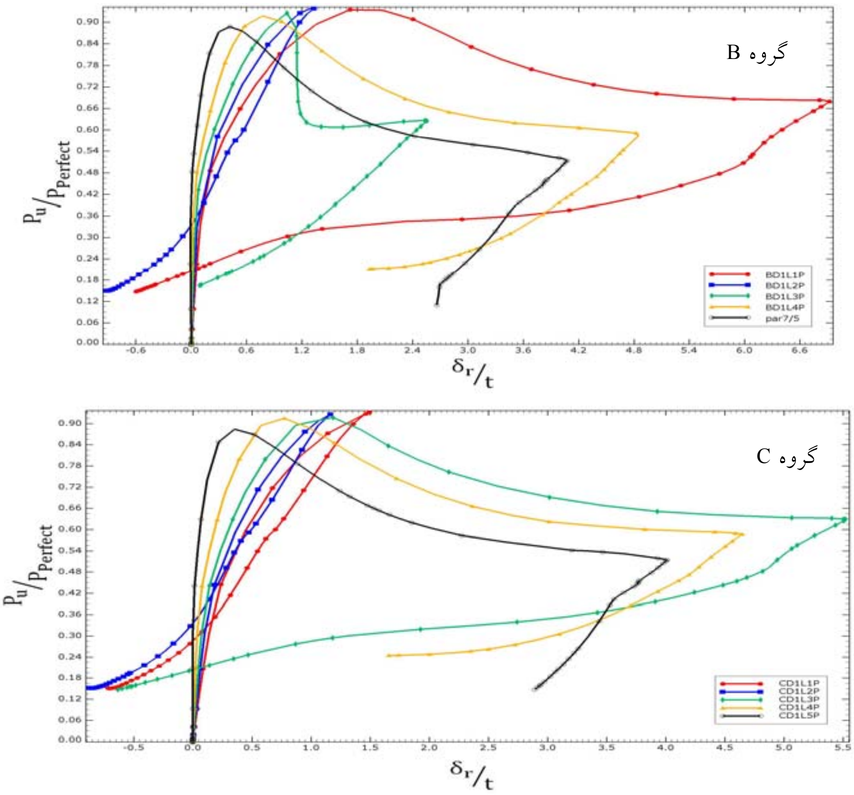
۳. در مدل‌های با دو ناکاملی نیز مانند نمونه‌های با یک ناکاملی، پس از وقوع یک کمانش اولیه، حفره‌های کمانشی در نزدیکی تکیه‌گاه بالایی مشاهده می‌گردد (شکل (۹)). در اکثر نمونه‌ها با تشکیل این حفره‌های کمانشی ثانویه، موج‌های کمانشی اولیه بر روی ناکاملی‌ها حرکت معکوس خود را شروع می‌کند که این امر در نمودار بار– تغییر مکان شکل‌های (۱۰) و (۱۱) کاملاً به چشم می‌خورد.



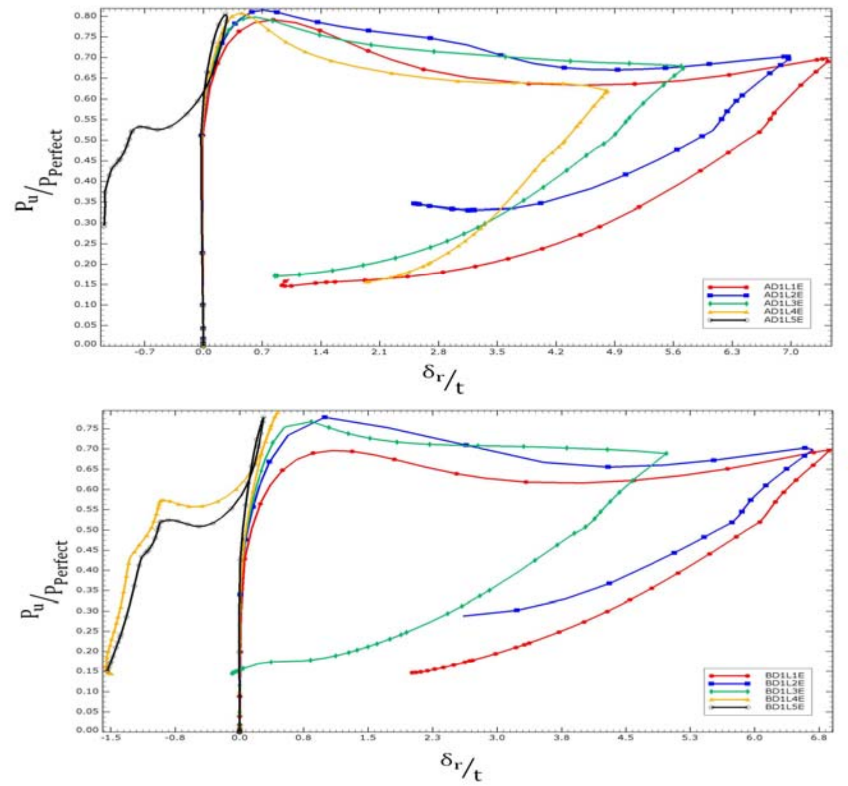
شکل ۹ تصویر چند نمونه از گروه C با دو ناکاملی مختلف حلقوی، الف) در حالت P ب) در حالت E



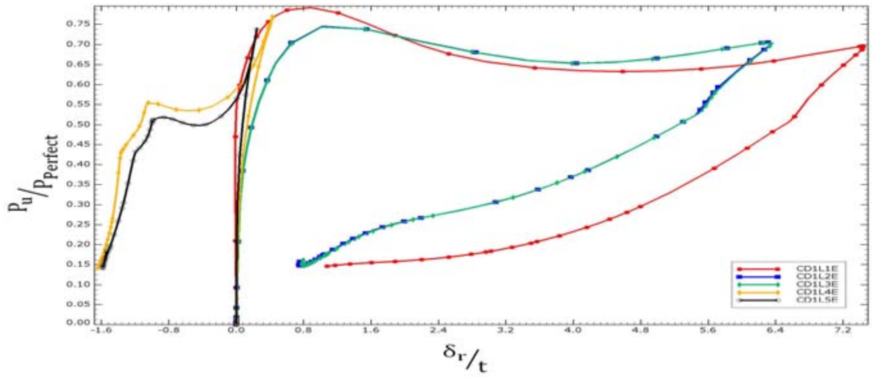
شکل ۱۰ نمودار های بار- تغییر مکان ۳ گروه برای نمونه ها با دو ناکاملی در حالت P (ادامه دارد)



ادامه‌ی شکل ۱۰ نمودار های بار- تغییر مکان ۳ گروه برای نمونه ها با دو ناکاملی در حالت P



شکل ۱۱ نمودار های بار- تغییر مکان ۳ گروه برای نمونه ها با دو ناکاملی در حالت E (ادامه دارد)



ادامه‌ی شکل ۱۱ نمودار های بار- تغییر مکان ۳ گروه برای نمونه ها با دو ناکاملی در حالت E

نتیجه‌گیری

۱. وجود ناکاملی‌های حلقوی می‌توانند به میزان چشم‌گیری افت ظرفیت در باربری محوری پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک ایجاد نمایند (در نمونه‌ی CD10L0 تا ٥٤٪ افت مشاهده شده است).

۲. افت ظرفیت باربری محوری به طول ناکاملی وابسته است؛ هر چه طول ناکاملی بیشتر شود، میزان افت ظرفیت باربری محوری نیز افزایش می‌یابد. اما این امر تا رسیدن به یک طول (زاویه‌ای مرکزی) معین ادامه می‌یابد. برای هر ناکاملی حلقوی، با توجه به عمق آن، یک طول (زاویه‌ای مرکزی) مشخص وجود دارد که افزایش ناکاملی بیش از آن، دیگر موجب افزایش در افت ظرفیت باربری محوری نمی‌شود (طول زاویه‌ای ۲۰° برای ناکاملی با عمق 1t در تحقیق حاضر).

۳. هر چه عمق ناکاملی کم‌تر باشد، طول حداقل ناکاملی که می‌تواند باعث افت ظرفیتی معادل یک ناکاملی ۳٦۰° را بنماید کم‌تر است.

٤. به‌علت ایجاد کمانش اولیه بر روی ناحیه‌ی ناکاملی و به اصطلاح، فرار این قسمت از زیر بار و باز توزیع بار، کمانش اصلی بر روی خود ناحیه‌ی ناکاملی ایجاد نمی‌گردد؛ بلکه در ناحیه‌ی تکیه‌گاهی و محلی که ناکاملی شروع و یا پایان می‌پذیرد، تشکیل می‌گردد.

٥. دو ناکاملی با طول و عمق برابر و به صورت موازی و بر روی هم (حالت P)، افت ظرفیت باربری محوری معادل یک ناکاملی تک با همان مشخصات را می‌کنند که هر چه به یکدیگر نزدیک‌تر شوند، میزان افت از این حالت نیز کم‌تر خواهد شد.

٦. دو ناکاملی با طول و عمق برابر و در امتداد هم ولی در ترازهای مختلف (حالت E)، افت ظرفیت باربری محوری را ایجاد می‌کنند که از یک ناکاملی تک با همان مشخصات بیشتر بوده و در بدترین حالت، افت ظرفیتی معادل یک ناکاملی حلقوی تک با طول ۲ برابر را موجب می‌گردد. هر چه دو ناکاملی به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند، این مقدار افزایش می‌یابد تا به حداکثر ذکر شده بیانجامد.

۷. نتیجه‌ی کلی حاصل از دو مورد فوق، این است که دو ناکاملی موازی و هم امتداد که هر یک در ترازی متفاوت ایجاد شده‌اند، به مراتب اثر کاهنده و مخرب‌تری، نسبت به حالتی که دو ناکاملی موازی بر روی هم ایجاد گردیده‌اند، دارند و باعث کاهش هر چه بیشتر ظرفیت باربری پوسته می‌گردند.

۸. در طول زاویه‌ای ۱۵°، افت ظرفیتی ناکاملی‌ها با اعماق مختلف تقریباً با هم برابر می‌شود و می‌توان این طول را حد تبدیل شدن ناکاملی به فرورفتگی (Dent) دانست که دیگر عمق ناکاملی تأثیر بسزایی در میزان افت ظرفیت باربری نخواهد داشت.

سپاسگزاری. از شرکت ملی مهندسی و ساختمان نفت ایران که انجام این تحقیق را از نظر مالی و علمی مورد حمایت قرار داده است، سپاسگزاری و قدردانی می‌گردد.

مراجع

1. Hübner A., Teng J.G., Saal H., "Buckling behavior of large steel cylinders with patterned welds", *International J Pressure Vessels and Piping*, 83:13-26, (2006).

2. Pircher M., Berry P., Ding X., Bridge R., "The shape of circumferential weld-induced imperfections in thin-walled steel silos and tanks", *J Thin-Walled Structures*, 39:999-1014, (2001).

3. Berry P., Rotter J., Bridge R., "Compression tests on cylinders with circumferential weld depressions", *J. Eng. Mech. ASCE,* 126(4), pp 405-413, (2000).

4. Kim S.E., Kim C.S., "Buckling strength of the cylindrical shell and tank; subjected to axially compressive loads", *J Thin-Walled Structures*, 40:329-353, (2002).

۵. یوسفیه ع. "بررسی اثر ناکاملی های هندسی بر رفتار کمانشی و فراکمانشی پوسته های استوانه ای جدار نازک، تحت بارگذاری محوری با استفاده از روش اجزاء محدود"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه، ایران، (۱۳۷۸).

٦. پورمیرزا م. "بررسی رفتار کمانشی و فراکمانشی مخازن دارای ناکاملی هندسی، تحت بار محوری؛ به روش آزمایشگاهی"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه، ایران، (۱۳۸۸).

7. API 620 "Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks" API 620, 10th Ed., American Petroleum Institute, Washington, D.C., (2002).

8. API 650 "Welded Tanks for Oil Storage." API 650, 11th Ed., American Petroleum Institute, Washington, D.C., (2009).

9. Pircher M., Bridge R., "The influence of circumferential weld-induced imperfections on the buckling of silos and tanks", *J Constructional Steel Research*, 57:569-580, (2001).

10. Teng J., Lin X., Rotter J.M., Ding X.l., "Analysis of geometric imperfections in full-scale welded steel silos" *J Engineering Structures*, 27: 938–950, (2005).

11. Koiter W.t., A translation of "The stability of elastic equilibrium", PhD thesis, Technische Hooge school, Delft, The Netherland, (1945).

12. ABAQUS. "Theory and user's manual", version 6.8-1, (2008).